第30卷 第5期
2016 年 5 月

材 料 研 究 学 报
CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH

Vol. 30 No. 5
May 2016

非金属弹丸高速撞击编织物填充式结构的损伤*

管公顺 李航杰 刘家赫 曾 明

(哈尔滨工业大学航天学院航天工程系 哈尔滨 150080)

摘 要 对陶瓷球和尼龙球弹丸进行循环加热, 并使用二级轻气炮发射弹丸高速撞击编织物填充式结构。非金属弹丸循环加热的温度范围为20−150℃, 撞击速度为1.52−3.26 km/s, 撞击角度为0°, 得到编织物填充式结构在不同材料弹丸高速撞击下的损伤模式, 研究了循环加热对非金属弹丸高速撞击破碎特性和编织物填充式结构撞击损伤特性的影响。结果表明, 在弹丸尺寸和撞击动能分别相同的情况下, 用陶瓷球弹丸高速撞击薄铝板比用铝球弹丸产生的穿孔尺寸更小; 循环加热后的陶瓷和尼龙弹丸造成填充层更大尺寸的中心撞击穿孔; 循环加热后陶瓷球弹丸对编织物填充式结构后板的高速撞击破坏能力增强, 尼龙球弹丸对后板的高速撞击破坏能力减弱。

关键词 无机非金属材料, 非金属弹丸, 循环加热, 高速撞击, 编织物, 损伤

分类号 V423.41, O347 文章编号 1005-3093(2016)05-0329-07

Investigation into Damage of Woven Stuffed Shield Impacted by High-Velocity Nonmetallic Projectile

GUAN Gongshun** LI Hangjie LIU Jiahe ZENG Ming

(Department of Astronautics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

*Supported by National Nature Science Foundation of China No. 11172083.

Manuscript received June 11, 2015; in revised form September 17, 2015.

**To whom correspondence should be addressed, Tel: (0451)86417978, E-mail: hitggsh@163.com

ABSTRACT A two-stage light gas gun is used to launch nonmetallic projectiles, which were heated cyclically before launch, impacting on woven stuffed shield. The damage model of woven stuffed shield impacted by projectiles of different materials was acquired. The effect of cyclic heating of nonmetallic projectile on the fragmentation characteristics of the projectile and the damage of woven stuffed shield was investigated. The nonmetallic projectile was heated cyclically in a temperature range of 20-150℃. Impact velocities of projectile varied in a range of 1.52-3.26 km/s. The impact angle was 0°. The results indicate that the perforation diameter of thin Al-plate impacted by ceramic projectile is smaller than that by Al-sphere when the size of the two projectiles are the same. The cyclically heated projectiles of ceramic and nylon can cause larger center impact perforations of woven stuffed bumper. Furthermore, the cyclic heating could enhance the damage capability of ceramic projectile but weaken that of nylon projectile on woven stuffed shield.

KEY WORDS inorganic non-metallic materials, non metallic projectile, cyclic heating, high-velocity impact, woven bumper, damage

随着新型材料在航天领域的应用, 空间碎片的材料组成已向多样化发展, 其中非金属材料空间碎片的数量呈增多趋势。长期处于高真空、高低温交变、强辐射等空间环境中的空间碎片在不同空间位置的温度相差较大, 使其力学、物理、化学性能发生变化[1-4]。高温将引起部分非金属材料的热老化[5], 低温将使部分非金属材料脆化[6], 空间温度的交变作用极易造成非金属材料的疲劳破坏[7]。因此, 非金属空间碎片高速撞击航天器所造成的结构与材料的损伤会有一定的差异[8, 9]。编织物填充式结构已广泛应用于航天器空间碎片防护结构中[10, 11]。编织物填充层的作用是阻挡次生小碎片, 降低次生碎片粒子群对航天器舱壁的撞击速度。不同材料空间碎片撞击产生的次生碎片粒子群使编织物填充层出现不同的损伤。本文针对铝网和玄武岩纤维布填充式结构, 使用二级轻气炮发射陶瓷球和尼龙球弹丸进

* 国家自然科学基金11172083资助项目。
2015年6月11日收到初稿; 2015年9月17日收到修改稿。
本文联系人: 管公顺, 教授
DOI: 10.11901/1005.3093.2015.334

行高速撞击实验，研究非金属弹丸在加热循环前后的高速撞击破碎特性和编织物填充式结构的高速撞击损伤与防护特性。

1 实验方法

实验中分别选用铝网和玄武岩纤维布作为填充层材料，前板是厚度为0.5 mm的2A12铝板，后板是厚度为3 mm的5A06铝板，铝网和玄武岩纤维布填充层面密度分别为0.134 g/cm^{2}和0.139 g/cm^2，与厚度为0.5 mm的2A12铝板面密度的相对偏差分别为-3.60%和0%。总防护间距为100 mm，填充式结构的填充层前表面与前板前表面相距50 mm。实验用的填充式结构，如图1所示。为了模拟空间温度交变环境对编织物填充式结构高速撞击损伤特性的影响，分别将铝网和玄武岩纤维布填充层降温至-70℃，再加热至180℃，反复循环5次。前板和后板未进行高低温循环处理。进行撞击实验时，前板、填充层和后板温度均为室温。

实验中使用的弹丸加速设备是用高压气体作为驱动力的二级轻气炮，一级使用氮气驱动活塞，充气压力为5-10 MPa，二级使用氢气驱动弹丸和弹托，充气压力为0.1 MPa，使用气动阻力实现弹丸与弹托的分离。用于模拟空间碎片的弹丸分别为陶瓷球、尼龙球和2017铝球，陶瓷球、尼龙球和铝球的直径分别为4 mm、5.56 mm和3.97 mm，质量分别为0.1289 g、0.1013 g和0.0918 g。分别将部分陶瓷球弹丸和尼龙球弹丸加热至150℃，然后再降至室温20℃，反复循环5次，铝球弹丸未进行高低温循环处理。撞击速度在1.52-3.26 km/s之间，撞击角度为0°，弹丸速度采用激光光束遮挡法测量，精度高于2%，撞击时靶舱内抽真空，靶舱内压力小于200 Pa，靶舱温度为室温。实验中共进行16次非金属弹丸对编织物填充式结构的撞击实验，实验状态列于表1。为了比较不同材料弹丸撞击薄铝板的穿孔特性，

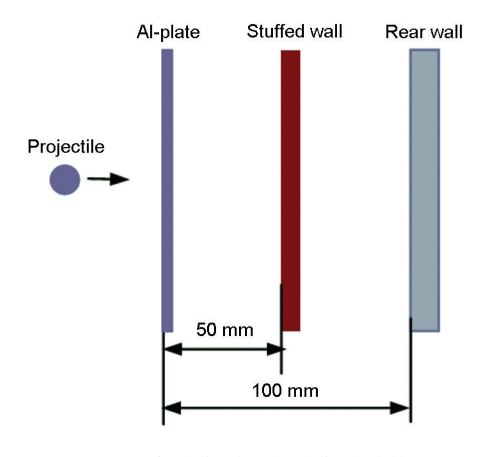


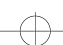
图1 实验中采用的填充式结构

Fig.1 Woven stuffed shield in the test

表1 非金属弹丸与填充层材料及实验状态

Table 1 Materials and test conditions of non metallic projectiles and woven stuffed walls

No.	Projectile			Stuffed wall		Velocity /km·s^{-1}	Temperature /℃
	Materials	Diameter /mm	Processing times	Materials	Processing times		
1	Ceramic	4	0	Al-mesh	5	3.26	20
2	Nylon	5.56	0	Al-mesh	5	3.09	20
3	Nylon	5.56	0	Basalt fiber cloth	5	3.13	20
4	Ceramic	4	0	Basalt fiber cloth	5	3.25	20
5	Ceramic	4	0	Al-mesh	5	1.69	20
6	Ceramic	4	0	Basalt fiber cloth	5	1.63	20
7	Nylon	5.56	0	Al-mesh	5	1.67	20
8	Nylon	5.56	0	Basalt fiber cloth	5	1.60	20
9	Ceramic	4	5	Al-mesh	5	3.01	20
10	Ceramic	4	5	Basalt fiber cloth	5	3.01	20
11	Ceramic	4	5	Basalt fiber cloth	5	1.69	20
12	Ceramic	4	5	Al-mesh	5	1.68	20
13	Nylon	5.56	5	Al-mesh	5	3.01	20
14	Nylon	5.56	5	Basalt fiber cloth	5	3.05	20
15	Nylon	5.56	5	Al-mesh	5	1.52	20
16	Nylon	5.56	5	Basalt fiber cloth	5	1.68	20



进行17次铝球弹丸对薄铝板的撞击实验。

2 结果和讨论

2.1 撞击损伤的形貌

分别用陶瓷球、尼龙球和铝球对编织物填充式结构进行高速撞击实验, 得到了填充层及后板在不同撞击速度时的损伤模式, 并对陶瓷球和尼龙球经过循环加热前后高速撞击编织物填充式结构的损伤情况进行了比较, 部分结果如图2和图3所示。陶瓷球和尼龙球弹丸高速撞击编织物填充式结构后, 前板均为圆形穿孔。撞击速度较低时尼龙弹丸撞击前板穿孔边缘塑性拉伸翻边并伴有花瓣状撕裂, 撞击速度较高时前板穿孔边缘整齐无明显塑性变形。编织物填充层在次生碎片粒子群撞击下出现中心撕裂大穿孔, 并伴随着填充层中心穿孔周围呈规律性分布的小穿孔, 表现为接近中心穿孔的小穿孔密集分布群和外围的小穿孔环状分布群, 如图2和图3所示。铝网填充层中心穿孔近似圆形, 末层铝网出现较大拉伸撕裂翻边。玄武岩纤维布填充层首层纤维布穿孔近似圆形, 末层纤维布穿孔近似方形。后板损伤, 主要表现为成坑、鼓包和穿孔等破坏形式。因弹丸材料和撞击速度不同, 后板损伤有所不同。当撞击速度在1.6 km/s附近时, 撞击后在后板撞击中心均出现不同深度的撞击坑, 并伴随撞击中心的背面鼓包, 如图2(a)、2(b)、3(a)、3(b)所示。当撞击时速度在3.1 km/s附近时, 陶瓷弹丸撞击后后板的损伤为不规则撕裂穿孔, 如图2(c)、2(d)所示。尼龙弹丸撞击后后板未失效且撞击面无明显撞击坑, 如图3(c)、3(d)所示。

2.2 前板穿孔

对于本文选用的三种弹丸, 当撞击动能较高时, 前板撞击后的穿孔边缘整齐光滑且无明显塑性变形。由图4可以看出, 随着撞击动能 E_i 的增大, 前板穿孔直径 D_h 相对于弹丸直径 d_p 的增量(D_h-d_p)以及前

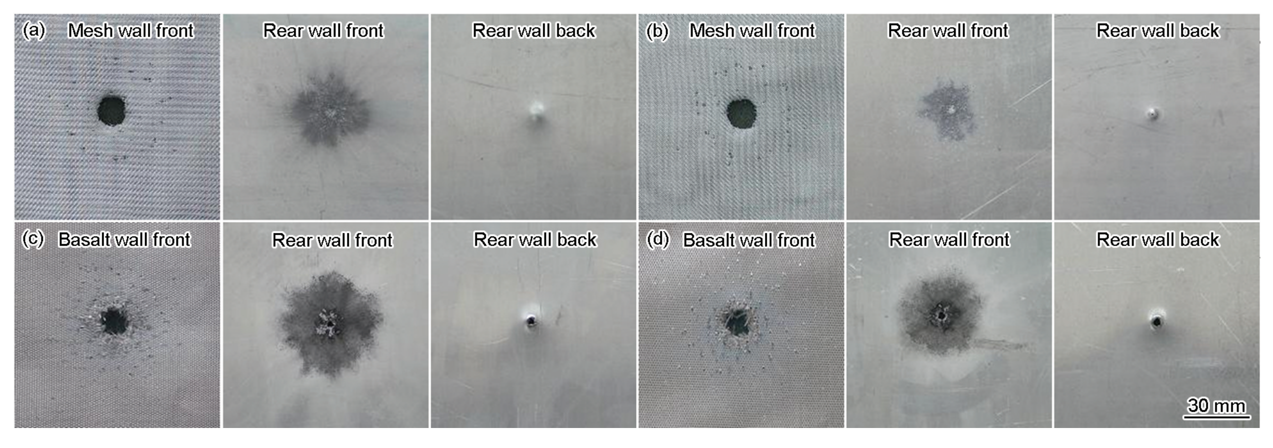


图2 陶瓷弹丸高速撞击填充式结构损伤结果

Fig.2 Damage results of woven stuffed shields impacted by high-velocity ceramic projectile (a) no cyclic heating, v_p=1.69 km/s; (b) cyclic heating, v_p=1.68 km/s; (c) no cyclic heating, v_p=3.25 km/s; (d) cyclic heating, v_p=3.01 km/s

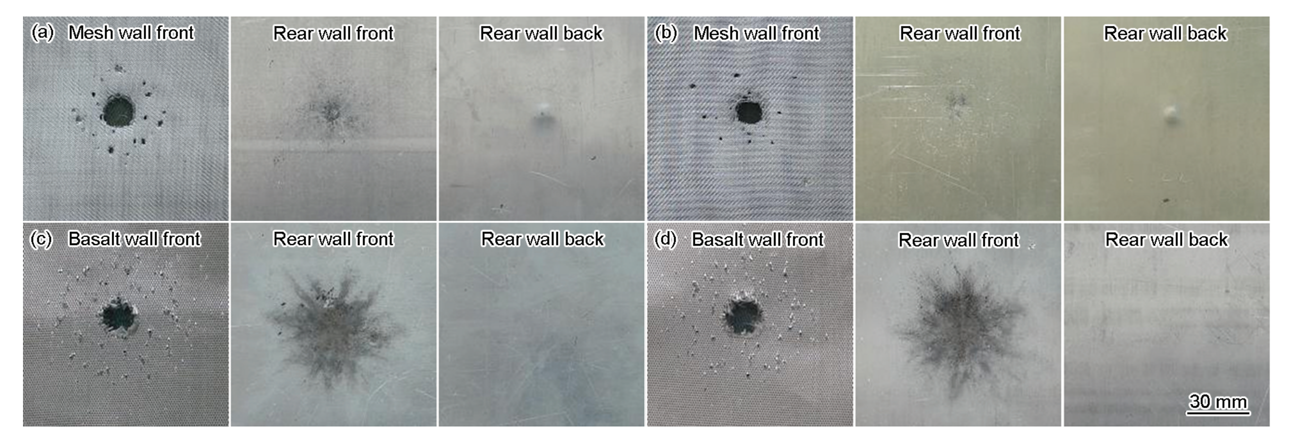
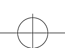
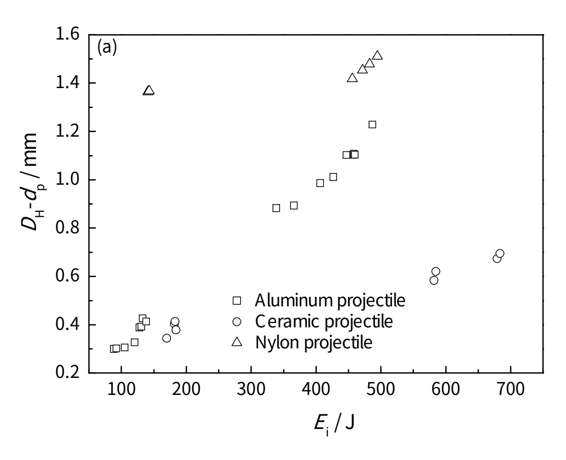


图3 尼龙弹丸高速撞击填充式结构损伤结果

Fig.3 Damage results of woven stuffed shields impacted by high-velocity nylon projectile (a) no cyclic heating, v_p=1.67 km/s; (b) cyclic heating, v_p=1.52 km/s; (c) no cyclic heating, v_p=3.13 km/s; (d) cyclic heating, v_p=3.05 km/s





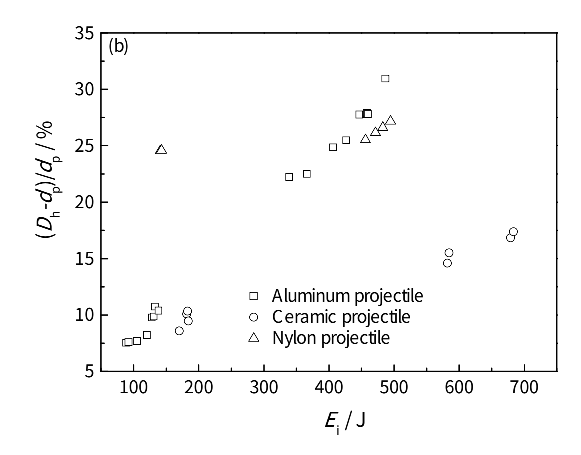


图4 前板穿孔尺寸与撞击动能的关系

Fig.4 Relationship between perforation size of thin AL-plate and kinetic energy (a) variation of (D_h-d_p) with E_i, (b) variation of (D_h-d_p)/d_p with E_i

板撞击穿孔扩大率(D_h-d_p)/d_p均逐渐增大。对于相同的撞击动能, 陶瓷球弹丸撞击前板的增量(D_h-d_p)最小, 尼龙球弹丸撞击前板的增量(D_h-d_p)最大, 且撞击动能越大两种弹丸撞击前板的增量(D_h-d_p)差距越大, 如图4(a)所示。同时, 陶瓷球弹丸撞击前板的(D_h-d_p)/d_p最小, 铝球弹丸撞击前板的(D_h-d_p)/d_p最大, 如图4(b)所示。当弹丸撞击动能较低时, 由于尼龙球弹丸撞击前板后的穿孔边缘出现了拉伸撕裂花瓣翻边等不稳定破坏, 穿孔尺寸的变化无法比较。

根据上述穿孔规律, 前板撞击穿孔的尺寸与弹丸材料有关。塑性较好的铝球和尼龙球弹丸高速撞击前板的穿孔扩大量明显大于高硬度的陶瓷弹丸, 因为在弹丸高速撞击靶板瞬间塑性材料弹丸将会在撞击方向上产生较大的压缩变形, 从而增大了弹丸的径向尺寸。当弹丸具有足够强度时, 弹丸的撞击导致靶板穿孔尺寸增大。同时, 硬度较高的陶瓷弹丸在撞击方向上的压缩量很小, 弹丸的径向尺寸增量也相对较小, 因此不会产生更大的靶板穿孔尺寸增量。

图5、图6分别给出了陶瓷球弹丸和尼龙球弹丸循环加热前后高速撞击前板时穿孔尺寸与撞击速度的关系。由图5可以看出, 陶瓷球弹丸高速撞击前板穿孔直径D_h随着撞击速度v_p的增加而增大, 且撞击速度在1.7 km/s附近时循环加热后的陶瓷球弹丸高速撞击前板穿孔尺寸较大, 撞击速度在3.1 km/s附近时循环加热后的陶瓷球弹丸高速撞击前板穿孔尺寸较小。由图6可以看出, 撞击速度在1.6 km/s附近时尼龙球弹丸高速撞击前板穿孔尺寸波动较大, 撞击速度在3.1 km/s附近时循环加热后的尼龙球弹丸撞击前板穿孔尺寸略有增加。这个结果表明, 经过循环加热后耐高温性能较强的陶瓷弹丸脆性增强, 当撞击速度较低时, 弹丸一定程度的破碎有助于增大铝板的穿孔尺寸, 当撞击速度较高时, 随着弹丸撞击破碎进一步细化, 其扩孔能力有所下降。

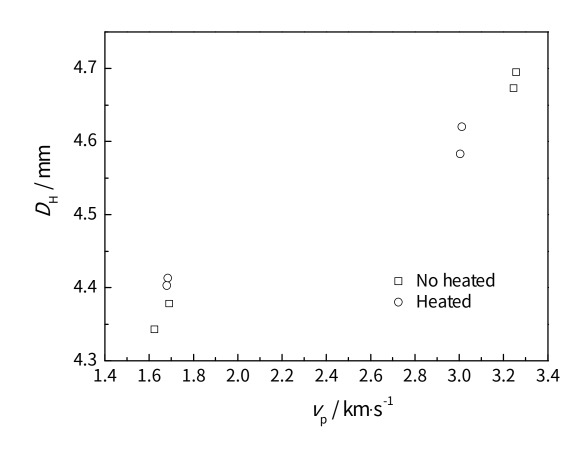


图5 陶瓷球弹丸高速撞击薄铝板穿孔直径与撞击速度的关系

Fig.5 Relationship between perforation diameter of thin AL-plate impacted by ceramic projectile and impact velocity

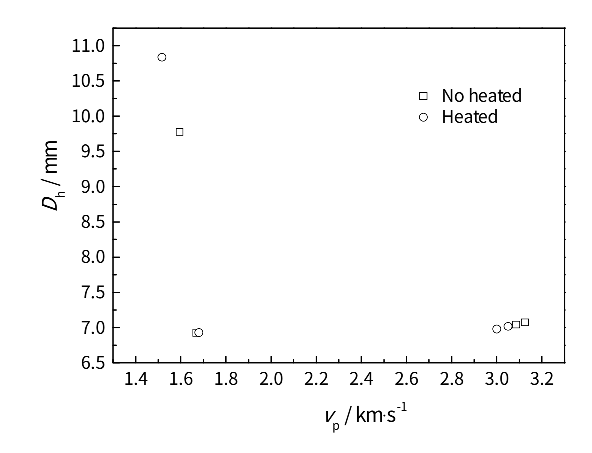


图6 尼龙球弹丸高速撞击薄铝板穿孔直径与撞击速度的关系

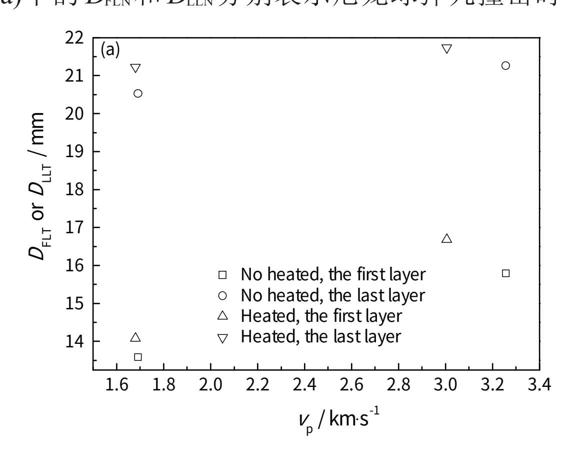
Fig.6 Relationship between perforation diameter of thin AL-plate impacted by nylon projectile and impact velocity

2.3 填充层损伤

填充层的损伤源于弹丸击穿前板所产生的次生碎片粒子群的撞击, 图 7 给出了陶瓷球弹丸高速撞击填充式结构时编织物填充层中心穿孔尺寸与撞击速度 v_p 的关系。图 7(a)中 D_{FLT} 和 D_{LLT} 分别表示陶瓷球弹丸撞击时铝网填充层首层和末层中心等效面积穿孔直径, 图 7(b)中 D_{FXT} 和 D_{LXT} 分别表示陶瓷球弹丸撞击时玄武岩纤维布填充层首层和末层中心等效面积穿孔直径。可以看出, 撞击速度越大则填充层中心穿孔尺寸越大, 且在撞击速度相同的情况下经过循环加热的陶瓷球弹丸使填充层产生了更大的中心撞击穿孔。对于铝网填充层, D_{LLT} 明显大于 D_{FLT}, 如图 7(a)所示。对于玄武岩纤维布填充层, 当撞击速度在 1.7 km/s 附近时 D_{LXT} 明显小于 D_{FXT}, 当撞击速度在 3.1 km/s 附近时 D_{LXT} 与 D_{FXT} 相接近, 如图 7(b)所示。

图 8 给出了尼龙球弹丸高速撞击填充式结构时编织物填充层中心穿孔尺寸与撞击速度 v_p 的关系, 图 8(a)中的 D_{FLN} 和 D_{LLN} 分别表示尼龙球弹丸撞击时铝网填充层首层和末层中心等效面积穿孔直径, 图 8(b)中的 D_{FXN} 和 D_{LXN} 分别表示尼龙球弹丸撞击时玄武岩纤维布填充层首层和末层中心等效面积穿孔直径。可以看出, 撞击速度越大则填充层中心穿孔尺寸越大。对于铝网填充层, D_{LLN} 均大于 D_{FLN}。与未经过循环加热的尼龙球相比, 当撞击速度在 1.6 km/s 附近时, 经过循环加热的尼龙球弹丸撞击产生的首层中心穿孔尺寸减小, 当撞击速度在 3.1 km/s 附近时, 经过循环加热的尼龙球弹丸撞击产生的首层中心穿孔尺寸增大, 末层中心穿孔尺寸减小, 如图 8(a)所示。对于玄武岩纤维布填充层, 与未经过循环加热的尼龙球相比, 经过循环加热的尼龙球弹丸撞击造成的填充层中心穿孔尺寸增大。当撞击速度在 1.7 km/s 附近时首末层中心穿孔尺寸无显著变化, 当撞击速度在 3.1 km/s 附近时 D_{LXN} 明显大于 D_{FXN}, 如图 8(b)所示。

上述填充层损伤的规律表明, 经过循环加热后的陶瓷弹丸在趋于硬化的同时脆性增大, 撞击前板产生了更多聚集在撞击中心区域的次生碎片粒子。



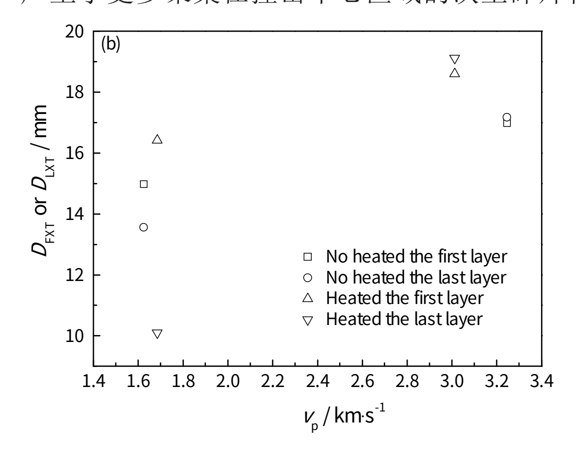
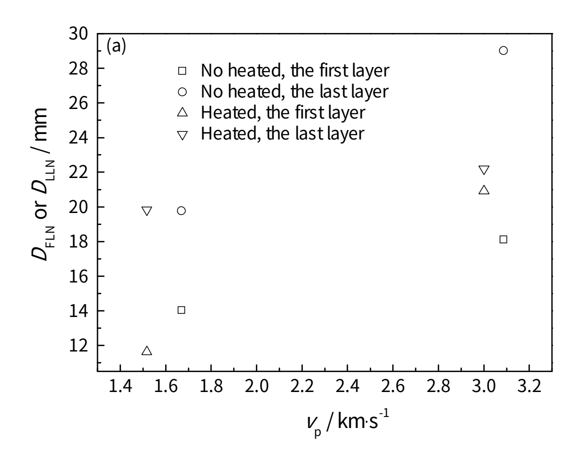


图 7 陶瓷球弹丸高速撞击时填充层损伤与撞击速度的关系

Fig.7 Relationship between damage of stuffed wall and impact velocity for ceramic projectile (a) variation of D_{FLT} or D_{LLT} with v_p, (b) variation of D_{FXT} or D_{LXT} with v_p



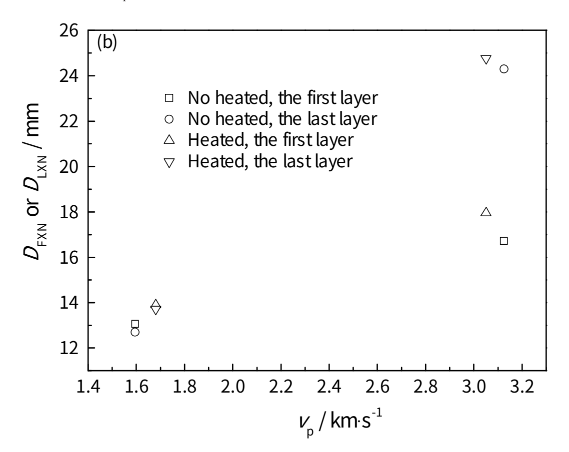
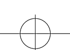


图 8 尼龙球弹丸高速撞击时填充层损伤与撞击速度的关系

Fig.8 Relationship between damage of stuffed wall and impact velocity for nylon projectile (a) variation of D_{FLN} or D_{LLN} with v_p, (b) variation of D_{FXN} or D_{LXN} with v_p



该粒子群的径向膨胀使其在更大面积上撞击填充层, 从而产生更大尺寸的中心穿孔。比较两种材料填充层首末层中心穿孔尺寸变化规律, 可见玄武岩纤维布比铝网具有更好的阻挡小碎片的能力。同时, 循环加热使尼龙弹丸的材料强度降低, 更易于碎裂, 不稳定性增大, 其次生碎片粒子穿透铝网填充层的能力减弱, 穿透玄武岩纤维布填充层的能力无显著变化。

2.4 后板损伤

弹丸材料与填充层材料不同, 撞击造成的后板损伤也有一定的差异, 图9给出了陶瓷球弹丸高速撞击填充式结构时后板损伤与撞击速度 v_p 的关系, 图中 H_{BT}、D_T 和 D_{99T} 分别表示后板鼓包高度、后板等效面积穿孔直径和后板撞击面最大影响范围直径。由图9(a)可以看出, 当撞击速度在1.7 km/s附近时, 对于两种材料填充式结构, 后板均未发生穿孔, 但是经过循环加热的陶瓷球弹丸撞击造成的 H_{BT} 较大。当撞击速度在3.1 km/s附近时, 对于两种材料填充式结构, 后板均发生穿孔失效, 但经过循环加热的陶瓷球弹丸撞击造成的 D_T 相对较大。由图9(b)可以看出, 在本文的撞击速度情况下, 经过循环加热的陶瓷球弹丸撞击造成的 D_{99T} 均大于陶瓷球弹丸未经过循环加热时的情况, 且 v_p 越大, D_{99T} 越大。同时, 与玄武岩纤维布填充式结构相比, 在相同的撞击条件下, 铝网填充式结构的 D_{99T} 更大。

图10给出了尼龙球弹丸高速撞击填充式结构时后板损伤与撞击速度 v_p 的关系, 图中 H_{BN} 和 D_{99N} 分别表示尼龙球弹丸撞击时的后板鼓包高度和后板撞击面最大影响范围直径。由图10(a)可以看出, 当撞击速度在1.6 km/s附近时后板背面均出现较小的鼓包, 且与未经过循环加热的尼龙球弹丸相比, 经过循环加热的尼龙球弹丸撞击造成的 H_{BN} 相对较小。当撞击速度在3.1 km/s附近时, 后板背面均无明显变化。由图10(b)可以看出, 在本文的撞击速度条件下, 经过循环加热的尼龙球弹丸撞击造成的 D_{99N} 均大于尼龙球弹丸未经过循环加热时的情况, 且 v_p 越大 D_{99N} 越大。同时, 与玄武岩纤维布填充式结构相比, 当 v_p 较低时铝网填充式结构的 D_{99N} 相对较大, 当

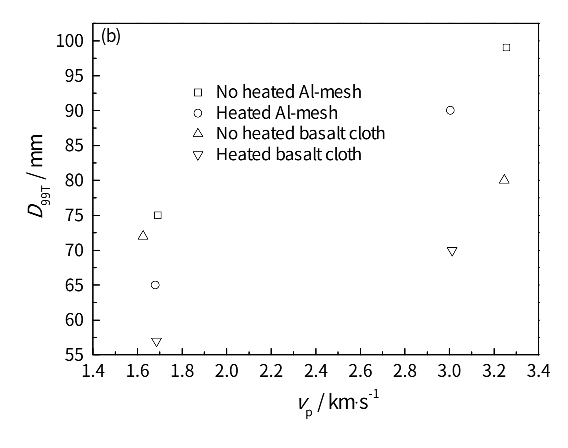
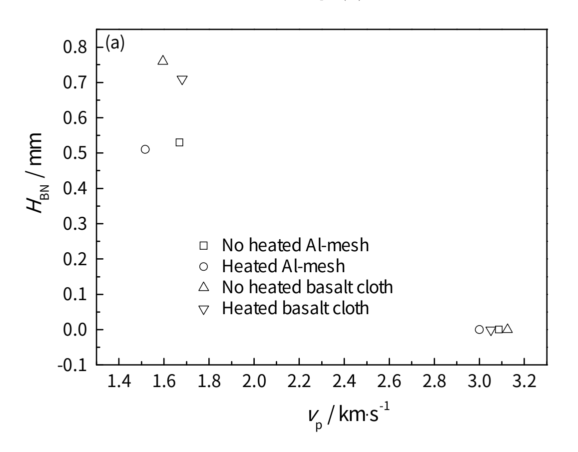


图9 陶瓷球弹丸高速撞击时后板损伤与撞击速度的关系

Fig.9 Relationship between damage of rear wall and impact velocity for ceramic projectile (a) variation of H_{BT} or D_T with v_p, (b) variation of D_{99T} with v_p



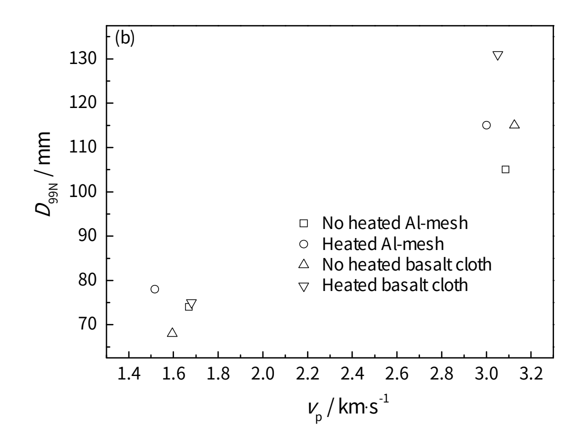


图10 尼龙球弹丸高速撞击时后板损伤与撞击速度的关系

Fig.10 Relationship between damage of rear wall and impact velocity for nylon projectile (a) variation of H_{BN} with v_p, (b) variation of D_{99N} with v_p

v_p较高时铝网填充式结构的D_{99N}相对较小。

根据后板损伤规律可知, 循环加热使陶瓷球弹丸对编织物填充式结构的高速撞击损伤能力提高, 使尼龙球弹丸对编织物填充式结构的高速撞击损伤能力减弱。其主要原因是, 循环加热使陶瓷弹丸硬度趋于增加, 撞击穿透能力增强。同时, 撞击前板后的次生碎片粒子趋于细化, 更有利于填充层对次生微小碎片的拦截阻挡, 因此后板撞击损伤加重但后板撞击面影响范围减小。另外, 循环加热使尼龙球弹丸塑性减弱, 撞击前板后的次生碎片粒子数增多, 对后板的撞击动能趋于分散, 因此后板撞击损伤减轻但D_{99N}增大。

3 结　论

1. 对陶瓷球和尼龙球弹丸进行循环加热, 并使用二级轻气炮发射弹丸高速撞击编织物填充式结构。当撞击动能相同时, 与铝球弹丸相比, 瓷陶球弹丸造成薄铝板更小的撞击穿孔。

2. 循环加热后, 陶瓷球弹丸和尼龙球弹丸均造成编织物填充层更大尺寸的中心撞击穿孔, 陶瓷球弹丸对编织物填充式结构后板的高速撞击破坏能力增强, 尼龙球弹丸对编织物填充式结构后板的高速撞击破坏能力减弱。

参 考 文 献

1 TONG Jingyu, Spacecraft reliability and space special environment test, Spacecraft Environment Engineering, **22**(1), 9(2005)
(童靖宇, 航天器可靠性与空间特殊环境试验, 航天器环境工程, **22**(1), 9(2005))

2 JIANG Haiyun, WANG Jigang, DUAN Zhichao, LI Fan, Study on the microstructure evolution of phenol- formaldehyde resin modified by ceramic additive, Chinese Journal of Materials Research, **20**(2), 203(2006)
(蒋海云, 王继刚, 段志超, 李　凡, 碳化硼改性酚醛树脂的高温结构演变特性, 材料研究学报, **20**(2), 203(2006))

3 SHEN Zicai, QIU Jiawen, DING Yigang, Space environment synergistic effect on spacecraft, Chinese Space Science and Technology, (5), 54(2012)
(沈自才, 邱家稳, 丁义刚, 航天器空间多因素环境协同效应研究, 空间科学技术, (5), 54(2012))

4 G. Lipika, K. Hiroshi, O. Nobuo, Degradation on a mechanical property of high-modulus aramid fiber due to hyperthennal atomic oxygen beam exposure, Composites Science and Technology, **67**(7), 1611(2007)

5 J. H. Han, C. G. Kim, Low earth orbit space environment simulation and its effects on graphite/epoxy composites, Composite Structures, **72**(2), 218(2006)

6 CAI Guangming, YU Weidong, Current status of research on flexible materials aging properties in space environment, Journal of Textile Research, **29**(12), 131(2008)
(蔡光明, 于伟东, 空间环境下柔性材料的老化性能研究现状, 纺织学报, **29**(12), 131(2008))

7 E. Grossman, I. Gouzman. Space environment effects on polymers in low earth orbit, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, **208**(8), 48(2003)

8 CHEN Xiaowei, CHEN Yuze, Review on the penetration/perforation of ceramics targets, Advances In Mechanics, **36**(1), 85(2006)
(陈小伟, 陈裕泽, 随性陶瓷靶高速侵彻/穿甲动力学的研究进展, 力学进展, **36**(1), 85(2006))

9 GUAN Gongshun, WANG Shaoheng, CHEN Fangyuan. Compression failure and mechanics behavior of PMMA under different loading strain Rates, Journal of Aeronautical Materials, **32**(6), 96(2012)
(管公顺, 王少恒, 成方圆, 不同加载应变率下有机玻璃的压缩破坏与力学行为, 航空材料学报, **32**(6), 96(2012))

10 M. Higashide, M. Tanakab, Y. Akahoshi, Hypervelocity impact tests against metallic meshes, International Journal of Impact Engineering, **33**(1-12), 335(2006)

11 P E Fahrenthold, Y K Park, Simulation of hypervelocity impact on aluminum-nextel-kevlar orbital debris shields, International Journal of Impact Engineering, **29**(1-10), 227(2003)

